Date : 10/10/2013
Pays : FRANCE
Page(s) : 50-52
Rubrique : Sciences
Diffusion : (84134)
Périodicité : Hebdomadaire
Surface : 257 %

Quand brillera le soleil d'Iter

Fusion contrôlée

Débutée en 2009, la construction du réacteur thermonucléaire Iter se poursuit à Cadarache. Au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) voisin, le projet West doit valider une étape clé de ce projet colossal. Enjeu : la source de production d'électricité du futur, quasi inépuisable. Reportage.

Mettre le Soleil en boîte. Disposer, comme notre étoile, d'une source d'énergie presque infinie. Depuis les travaux sur la structure du noyau atomique, depuis la formule $E = mc^2$ d'Einstein, on sait la chose théoriquement possible. Technologiquement, en revanche, le rêve de la domestication de la fusion nucléaire semblait hors de portée. Trop d'inconnues scientifiques, trop de verrous techniques.

Mais production d'énergie et puissance ne riment pas seulement en physique. Dans les années qui suivent la Seconde Guerre mondiale, il s'agit aussi d'un enjeu géopolitique. Mission fut donc donnée aux chercheurs, des deux côtés du rideau de fer, de relever cet incroyable défi. Dans ce domaine, les Soviétiques furent pionniers. Leurs ingénieurs développèrent une méthode dite de confinement magnétique, qui consiste à piéger la matière sous forme de plasma *(lire notre encadré)* dans une cage où la superposition de deux champs magnétiques créés par des bobines permet d'atteindre les températures nécessaires à la fusion. Dénommée *toroidalnaya kamera magnitnymi katushkami* ("chambre torique de confinement magnétique"), cette cage en forme d'anneau passera à la postérité par son acronyme russe : le tokamak.

La température doit être de plusieurs millions de degrés pour que la réaction de fusion se déclenche.

C'est par ce tokamak que passe le chemin de la fusion. En quarante ans, grâce à des progrès tant théoriques que technologiques, les températures atteintes ont été multipliées par 1 000 et la "durée de vie" des plasmas par 100 000. Les Français ne furent pas en reste, notamment avec TFR, le tokamak de Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), ou avec Tore Supra, sur le site du CEA à Cadarache (Bouches-du-Rhône) : premier plasma en 1988, la barrière des deux minutes de stabilité franchie en 1996, et un record du monde – plus de six minutes – en 2003.

Néanmoins, un plasma destiné à rendre possible la fusion nécessitera d'aller beaucoup plus loin et de surmonter les problèmes électrotech-

Énergie Fusion, mode d'emploi

Le noyau des atomes est composé de neutrons et de protons liés ensemble par l'interaction forte, responsable de l'énergie de liaison nucléaire. On peut libérer cette énergie de deux façons : soit en cassant des noyaux lourds, c'est la fission, mise en œuvre dans les centrales nucléaires actuelles ; soit en fusionnant des noyaux légers, on parle alors de fusion nucléaire. Cette réaction de fusion se déroule au cœur des étoiles ; à des températures de l'ordre du million de degrés, la matière est un plasma (son quatrième état avec solide, liquide et gazeux). Elle est alors comparable à une "soupe" dans laquelle noyaux et électrons ne sont plus liés et circulent librement. Assez rare sur Terre (on le retrouve dans les tubes au néon, autour des éclairs, dans les aurores boréales), il s'agit de l'état le plus courant dans l'Univers. Dans un plasma, deux noyaux légers qui se percutent à grande vitesse peuvent fusionner, créant un noyau plus lourd ; la différence de masse est libérée sous forme d'énergie, qui est à l'origine de la chaleur qu'émet le Soleil. Dans le cœur des étoiles, quatre noyaux d'hydrogène forment des noyaux plus lourds et donnent de l'hélium ; sur Terre, où les conditions (de pression notamment) ne sauraient être les mêmes, le processus doit être différent. Dans le tokamak d'Iter, il s'agira d'une fusion deutérium-tritium (D-T), deux isotopes de l'hydrogène, dont l'un, le tritium, est radioactif. **M. F.**

Tous droits de reproduction réservés

Date : 10/10/2013
Pays : FRANCE
Page(s) : 50-52
Rubrique : Sciences
Diffusion : (84134)
Périodicité : Hebdomadaire
Surface : 257 %

Un technicien inspecte le tore de la chambre à plasma de West, au CEA. Iter nécessitera un niveau de maîtrise technologique jamais atteint.

BORIS HORVAT/AFP

niques liés au chauffage de ce plasma et à la gestion de sa température, qui doit être de plusieurs millions de degrés Celsius pour que la réaction de fusion se déclenche, au contrôle de sa densité (qui gouverne la probabilité de rencontres des noyaux atomiques que l'on souhaite faire fusionner) et à l'allongement du temps de confinement. Autant de paramètres qui vont définir la "rentabilité" du processus.

Le jeu en vaut la chandelle. En théorie, un réacteur thermonucléaire, dont le tokamak est l'organe vital, est un système parfait. Pour le rendement, tout

Une légère altération du plasma provoque l'arrêt de la réaction : tout risque d'emballement est exclu.

d'abord. La fusion quotidienne de moins de un kilo de deutérium et de tritium produirait la chaleur nécessaire à la production de 1 000 mégawatts d'électricité en continu, soit ce que l'on réalise aujourd'hui dans une centrale thermique à partir de 5 000 tonnes de combustibles fossiles. Abondant et équitablement réparti sur la planète, le combustible employé pour la fusion pourrait être produit à partir d'eau de mer.

La sécurité, ensuite : dans un réacteur à confinement magnétique, une légère altération de l'un ou l'autre des paramètres de la "décharge plasma" provoque l'arrêt immédiat de la réaction : tout risque d'emballement est exclu. "Tenir" le plasma le plus longtemps possible constitue même l'une des principales difficultés du processus. De plus, le tritium est certes radioactif, mais il a une période relativement courte ; sa production devra se faire *in situ*, ce qui exclut les dangers inhérents à un approvisionnement extérieur, et il n'y aura jamais plus de un gramme de combustible présent dans le plasma – contre 150 kilos d'uranium enrichi dans une centrale nucléaire... Enfin, la production d'énergie se fera comme dans une centrale classique : extraction de chaleur, fluide caloporteur, turbines, production d'électricité. Nul besoin de nouveaux réseaux de distribution.

"Tous les pays sont prêts à payer un ticket d'entrée" pour un projet de ce type.

Telle est l'ambition portée par Iter (International Thermonuclear Experimental Reactor). Notons toutefois que, dans l'acronyme, le mot "expérimental" est important. Iter ne produira pas d'électricité. C'est un prototype supposé démontrer la faisabilité d'un réacteur industriel de production d'énergie par fusion nucléaire. Il permettra de mieux comprendre le régime de référence, de mieux lire le scénario de gestion d'un plasma, bref : de se familiariser avec cet objet.

Pour que le système s'incarne, il faudra attendre le successeur d'Iter – qui pourrait avoir pour nom Demo. Une échéance encore lointaine, qui a valu à Iter de nombreuses critiques. *« Cher et hasardeux »*, *« mobilisateur de moyens »*, présentant pour certains experts *« trop de verrous technologiques, trop d'incertitudes physiques »*, voire se réduisant à un simple *« jouet pour scientifiques »*, aux dires d'industriels de filières concurrentes.

« Si ça avait été simple, ça aurait été fait avant », lâche, philosophe, Robert Arnoux, un membre de l'équipe de communication d'Iter. Et de rappeler que la facture du projet (15 milliards d'euros en dix ans) sera réglée par plus de trente pays : Chine, Inde, Corée du Sud, Japon, Russie, États-Unis et Union européenne. *« Tous les pays sont prêts à payer un ticket d'entrée »* pour un projet de ce type, dont l'enjeu va au-delà de tout ce qui a été fait jusqu'alors dans le domaine.

À Cadarache même, Iter peut compter sur le soutien du CEA, son voisin, dont l'implantation historique en ce lieu et l'expertise mondialement reconnue ont joué un rôle important au moment du choix du site provençal, en 2005. Directeur de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (IRFM), Alain Becoulet l'assure : depuis 2010, l'Institut

Tous droits de reproduction réservés

Date : 10/10/2013
Pays : FRANCE
Page(s) : 50-52
Rubrique : Sciences
Diffusion : (84134)
Périodicité : Hebdomadaire
Surface : 257 %

Valeurs actuelles

Les ingénieurs de l'IRFM observent un plasma généré par le tokamak Tore Supra. À droite, les plots parasismiques sur lesquels reposera Iter.

PHOTOS : GÉRARD JULIEN/AFP – PHILIPPE STROPPA/CEA

« met tout en œuvre pour aider Iter ». Cette aide passe notamment par la transformation de Tore Supra, le tokamak de l'Institut, détenteur du record du monde de 2003, en West, pour W Environment in Steady-state Tokamak, (W est le symbole chimique du tungstène), qui constituera une répétition, partielle et de taille réduite, d'un composant clé de la chambre à plasma d'Iter, le divertor. Directeur du projet, Jérôme Bucalossi en détaille les objectifs scientifiques : *« Évaluer les performances en matière d'extraction de chaleur des composants face au plasma, explorer les problématiques liées aux plasmas longue durée en environnement tungstène et, enfin, mieux comprendre les interactions plasma-paroi… »*

Une route finalement bien balisée jusqu'au succès final ? *« Le physicien que je suis n'a plus de doutes, en tout cas pour Iter*, affirme Alain Becoulet. *Mais il reste des progrès à faire, c'est certain. Il faut montrer que c'est technologiquement possible, puis industriellement rentable. »* Plusieurs problèmes subsistent. Premier point : le réacteur à fusion devra être alimenté en continu en combustible. Or, si le deutérium est largement présent sur Terre, il faudra, on l'a dit, produire le tritium *in situ*. Ce sera le rôle de la couverture tritigène en lithium. En absorbant les neutrons produits par la réaction de fusion, celui-ci se recombine en hélium et en tritium, qui compense celui brûlé dans la fusion. Second point : mieux comprendre les phénomènes de disruption (perte de plasma due à des instabilités, à des chutes de température diverses, à des turbulences…), sur lesquels les physiciens ont longtemps buté. L'expérience accumulée ainsi que l'amélioration des instruments de modélisation et de diagnostic laissent augurer des progrès décisifs.

Iter devra aussi qualifier les systèmes d'évacuation de la chaleur – notamment la question cruciale des matériaux. Les composants qui font face à un plasma doivent en effet évacuer d'énormes quantités de chaleur. Situé sur le "plancher" de la chambre à vide, le divertor d'Iter devra assurer cette fonction : c'est aussi l'enjeu du projet West. Les matériaux capables de fournir les conditions de conductivité et de supporter les contraintes et les fortes températures existent, mais doivent être validés dans un environnement de tokamak en fonction.

Que tous ces problèmes fassent l'objet de programmes de recherche propres, mobilisent des équipes entières de scientifiques, n'empêche pas certains de voir encore Iter comme une chimère. Pourtant, sur le site même, dans la vallée de la Durance, non loin du défilé de Mirabeau, on sent l'aventure en marche. La plate-forme a été aménagée. Le radier a été coulé, équipé de 493 plots parasismiques sur lesquels s'appuieront les dizaines de milliers de tonnes de la structure principale, qui culminera à 73 mètres de hauteur. En janvier 2013, les bâtiments officiels ont été inaugurés par Geneviève Fioraso, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

> Quelque 230 convois vont acheminer les composants d'Iter vers Cadarache.

Le 20 septembre, un convoi exceptionnel – une remorque de près de 800 tonnes – est arrivé au petit matin, après avoir parcouru en quatre nuits la centaine de kilomètres séparant Berre-l'Étang de Cadarache. Un test pour la trentaine d'ouvrages (ponts, voûtes, canalisations) qui, en six ans, vont voir défiler les 230 convois nécessaires à l'acheminement des composants en cours de fabrication dans le monde. Pour le premier plasma, il faudra attendre 2020 et sept années de plus pour le plasma thermonucléaire.

Si les plasmas se font attendre, les retombées financières sont déjà là : les différents acteurs du programme ont dépensé 2,6 milliards d'euros – dont la moitié est allée à des entreprises françaises. Le site d'Iter accueille aujourd'hui 500 salariés : il y en aura dix fois plus dans cinq ans. Comme le rappelle Robert Arnoux, Iter vient aussi du latin "chemin". Le chemin sera difficile, mais savoir penser dans la durée est une chose que l'individu moderne a oubliée et qu'il gagnerait à redécouvrir. La conquête spatiale ou la création du parc nucléaire français furent aussi des projets au long cours. C'est à cette grande aventure technologique et humaine qu'Iter et tous les projets qui l'accompagnent nous invitent. ● **Mickaël Fonton**

Tous droits de reproduction réservés